



TITLE:

Experimental Study on Subcooled Boiling-induced Vibration of a Heater Rod near Walls(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Takano, Kenji

CITATION:

Takano, Kenji. Experimental Study on Subcooled Boiling-induced Vibration of a Heater Rod near Walls. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-09-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19994>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	高野賢治
論文題目	Experimental Study on Subcooled Boiling-induced Vibration of a Heater Rod near Walls（壁近傍の発熱棒に生ずるサブクール沸騰誘起振動に関する実験的研究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>高熱流束を有する発熱構造体がサブクール水中で表面沸騰を生じる際、蒸気泡が構造体表面で成長、合体、移動する等の過程で構造体の振動、いわゆるサブクール沸騰誘起振動（Subcooled Boiling-induced Vibration：SBIV）を発生する場合があります、このSBIVの基礎的現象を理解するため、単一発熱棒の大気圧下プール沸騰によるSBIV確認実験および、発熱棒近傍に1枚ないし2枚の壁を設置し、壁の存在や壁配置が及ぼすSBIVへの影響を実験的に評価するとともに、SBIV発生メカニズムについて詳細に検討した。本論文は、その成果を取り纏めたものであり、6章から構成されている。</p> <p>第1章は、緒言であり、本研究の工学的な背景および関連する研究の現状について述べた後、本研究の目的と得られた結果に対する評価検討のねらいが述べられている。</p> <p>第2章では、実験装置および実験方法の説明および、後述する2つの実験体系での実験結果について詳述されている。具体的には、実験装置は長さ約15cm、外径12.4mmの発熱棒を小型水槽の天井に固定し、自由端である燃料棒下端に加速度計を設置した体系であり、水槽のバルク水温度および発熱棒温度を熱電対で測定し、蒸気泡の挙動を高時空間分解デジタルビデオカメラで可視化観察しつつ、発熱棒の振動挙動を加速度計で測定している。実験体系は2種類あり、実験体系1では壁の存在によるSBIVへの影響を明らかにするため、発熱棒からの距離（ギャップ）5mmにおける金属壁の設置有無の影響を測定している。実験体系2では壁配置の違いによるSBIVへの影響を明らかにするため、1枚壁：単一発熱棒近傍に壁1枚を配置、平行壁：単一発熱棒を2枚の平行壁で挟み込む配置、コーナー壁：単一発熱棒の周囲に直交壁(2枚壁)を配置、の3種類それぞれに対し、ギャップを1mmと3mmの2種類設定して可視化観察と加速度計測を行った結果を詳述している。</p> <p>第3章では、実験結果の分析から、SBIVに影響を与える発生蒸気泡の挙動およびSBIV時の発熱棒加速度について検討し、実験体系1では、壁の存在が発熱棒の壁方向の加速度を増加させる効果を持つことを見出し、実験体系2では、1K～8Kのサブクール領域で実験を行い、1枚壁でもギャップ1mmの場合は、ギャップ間に長楕円形状気泡が成長し、10mm程度に達するとギャップから抜け出し、サブクール水と接触して揺らぎながら凝縮する現象、すなわち、凝縮が振動を励起するSBIVの特徴的な現象を初めて明確に見出している。この現象は周期的に発生し、大気泡が抜け出した際には壁の無い方向において大きな加速度変化を生ずることも明らかにしている。さらに、平行壁の場合は、発熱棒の両側で1枚壁と同様の現象が発生するため、ギャップ1mmでは発熱棒の両側のギャップから抜け出した長楕円形状の大気泡同士が壁の無い方向で相互干渉し、気泡合体を生じる際に、蒸気泡がサブクール水と接触して大きく揺動する様子を可視化観察で明らかにするとともに、壁の無い方向に瞬時に大きな加速度変化を生ずる計測結果との整合性を確認している。また、コーナー壁の場合においても、平行壁と同様に2つのギャップから大気泡が抜け出してくるが、コーナーと対角方向の領域にサブクール水が十分に存在するため、気泡の揺動や凝縮の頻度が平行壁に比べて多く、SBIV加速度がコーナ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	高野賢治
<p>一対角線方向に増加する傾向を明らかにしている。</p> <p>第4章では、第3章で明らかにした蒸気泡挙動および発熱棒のSBIVの傾向を踏まえて、SBIVに与える壁の影響を考察している。まず、壁の存在によるSBIVへの影響については、単一発熱棒の近傍に金属壁を設置することでギャップにおける発熱棒表面付近の水温を上昇させ、過熱状態のマイクロレイヤーの形成を促し、ギャップ内の気泡を大きく成長させ、大気泡がギャップを抜け出る際の気泡揺動とサブクール水による凝縮によって発熱棒が壁方向へより励振されるSBIVメカニズムであると考察している。さらに、ギャップ1mmの場合について、ギャップを埋めるように成長する10mm大の気泡周りの局所過熱度がMikicらの式を用いて3~5Kであると評価し、大気泡生成を裏付ける十分に厚いマイクロレイヤーが発熱棒表面に形成され、気泡へ熱供給しているモデルを提示している。また、大気泡の成長は気泡周囲に局所的な対流を引き起こし、これに伴ってサブクール水がギャップ内へ流入し、大気泡はギャップ外へ移動するが、その際の気泡上昇速度は浮力による理論値の1/2~1/3であり、気泡は発熱棒から抗力を受けていることを明らかにした。すなわち、大気泡はギャップから抜け出る状態においても発熱棒と接しており、壁の無い方向では、サブクール水による大気泡の揺動や凝縮が圧力変化として直接的に発熱棒の振動を引き起こしているSBIVメカニズムであることを裏付けている。一方、発熱棒の振動加速度データを高速フーリエ変換処理した周波数特性解析の結果、どの壁配置の場合でも発熱棒の1次固有振動数に相当する600Hz付近の加速度スペクトル密度がランダム振動的に励起されていることと、低サブクール条件では100Hz以下の加速度スペクトル密度が増加傾向を示すことを見出している。また、平行壁では加速度が大きく、励起される周波数領域が100Hz付近であるのに対して、1枚壁やコーナー壁の場合は50Hz付近であることを明らかにし、この相違が気泡挙動観察より読み取った大気泡の発生頻度に整合していることを突き止めている。</p> <p>第5章では、実験結果とSBIVに対する壁配置の影響に関する考察を踏まえ、実際の原子燃料で想定されるSBIVについて考察している。実験体系2で設定したギャップ3mmは実際の原子燃料の燃料棒間の距離におおよそ一致しており、さらにギャップ1mmの条件は燃料棒が挿入されている構造体(グリッド)のセルにおけるセル板と燃料棒の距離におおよそ一致することから、実験体系2で明らかにされた大気泡発生とサブクール下での気泡揺動や凝縮によるSBIVは、熱的条件が整えば原子燃料においても発生する可能性のあることを指摘している。但し、使用済燃料の崩壊熱による熱流束は、実験体系2の場合よりも桁違いに小さいため、本事象については今後に十分な検討が必要であることも併せて指摘している。</p> <p>第6章は総括結論であり、SBIVの基礎的現象として単一発熱棒の近傍に金属壁を設置することによる影響を明らかにした上で、気泡挙動がSBIVを引き起こすメカニズムを整理し、実際の原子燃料における事象の発生可能性の考察を含めて本研究成果を纏めている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、サブクール沸騰誘起振動 (SBIV) の基礎的現象を理解するために、単一発熱棒の大気圧下プール沸騰による SBIV 実験および、発熱棒近傍に壁を設置し、壁の存在や壁配置が及ぼす SBIV への影響評価および SBIV 発生メカニズムの検討結果について、その成果を取り纏めたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 壁の存在により、発熱棒との間の領域 (ギャップ) における水の局所温度が壁の無い場合よりも上昇し、気泡成長が促進され、大きな気泡がギャップにおいて凝縮するため、発熱棒の SBIV 加速度が壁方向に大きくなることを明らかにした。
2. 低サブクール度程、ギャップに生成される蒸気泡は大きく成長し、その大気泡がギャップから移動、離脱する際に発熱棒を励振することを明らかにするとともに、大気泡がギャップから移動してサブクール水と接触、揺動、凝縮することが発熱棒の SBIV が発生する原因であると考察し、壁の無い方向に発生する SBIV メカニズムを明らかにした。
3. ギャップ内で成長する大気泡周りの局所過熱度を評価し、大気泡生成を裏付ける十分に厚いマイクロレイヤーが形成されていることを推定した。
4. 大気泡がギャップ外へ移動する際の気泡上昇速度が浮力による理論値の $1/2 \sim 1/3$ であると推定し、大気泡が壁の無い方向でもマイクロレイヤーから熱供給を受けつつ発熱棒から抗力も受けることをモデル構築により検討し、サブクール水による大気泡の揺動や凝縮が直接的な SBIV メカニズムであることを裏付けた。
5. 振動加速度データの周波数特性解析から、発熱棒の 1 次固有振動数におけるランダム振動的な励起と、低サブクール条件での 100Hz 以下の加速度励起を明らかにした。壁配置の違いによる 100Hz 以下の加速度励起の違いを考察し、それが気泡挙動観察より読み取った大気泡の発生頻度に整合していることを突き止めた。
6. SBIV に対する壁配置の影響に関する実験結果と考察を踏まえ、実際の原子燃料で想定される SBIV について考察した。本実験における壁配置の設定が、実際の原子燃料の燃料棒を取り囲む構造との位置関係に相当することから、使用済燃料ピットにおいて循環冷却が損なわれる場合には、実験で明らかにした SBIV について十分な検討が必要であることを指摘した。

以上のように、本論文はサブクール沸騰誘起振動 (SBIV) の基礎的現象を理解するために行った実験結果に基づいて、壁の存在や壁配置が及ぼす影響評価および発生メカニズムの考察に関する成果を取り纏めたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 8 月 18 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。